

討31

線材棒鋼製品の不純物元素の低減の効果

(株)神戸製鋼 神戸 塩籠 潔 山田凱朗 小新井治朗
中研 井上 毅

1. 緒言

線材、棒鋼製品の大部分は、各種の2次加工や熱処理を受け、最終製品に仕上げられる。近年これらの加工技術や熱処理方法の進歩は著しく、着実に部品製造までの原価が低減されている。加工技術面では、特に伸線加工や冷間鍛造等の冷間加工分野の拡大がなされ、極細線や複雑な形状のものまで冷間成形されている。熱処理面では、焼入技術の進歩により、低温焼戻しによる高強度化や低歪化が指向されている。

このような背景の中で、素材である線材、棒鋼製品への品質要求が高度化している。特に成分面では主成分以外に、不純物元素であるP、S、O、Nの影響が見逃せないものとなっている。

本報告は、主に冷間加工面と熱処理面から見た、線材、棒鋼製品での不純物元素の影響についてこれまでの調査結果をまとめたものである。

2. 冷間加工性と不純物元素について

① 冷間鍛造性

冷間鍛造加工での加工限界について、前組織の影響やSの影響について古くから報告されているが、Pの影響については明確にした例は少ない。著者らは、P、Sを各々3水準にコントロールしたTable1に示す9チャージの供試材を使用し、均束圧縮試験を実施し、加工限界を求めた。尚試験片は溝付円柱試験片(20mmφ×30mm高さ、溝深さ×溝幅=0.3mm×0.3mm)を使用した。又前組織として、焼ならし、徐冷法による球状化、焼入焼戻し法による球状化処理の3条件とし、各々について、実験した。

各チャージの試験結果を、各々の組織条件下で重回帰分析を実施した結果、加工限界を示す溝底ひずみ(ε_G)は下記の式に整理することができた。

Table 1. Chemical composition of materials for up-setting test. (%)

	C	Si	Mn	P	S	Al
LPL	0.42	0.24	0.65	0.006	0.002	0.027
LPM	0.42	0.20	0.78	0.004	0.011	0.044
LPH	0.43	0.20	0.78	0.004	0.023	0.026
MPL	0.44	0.27	0.82	0.009	0.002	0.032
MPM	0.39	0.27	0.88	0.010	0.011	0.049
MPH	0.38	0.26	0.88	0.010	0.018	0.042
HPL	0.48	0.31	0.79	0.017	0.002	0.049
HPM	0.40	0.26	0.88	0.017	0.013	0.046
HPH	0.40	0.25	0.89	0.017	0.023	0.040

$$\epsilon_G(N) = 1.015 - 0.771(C) - 0.758(Si) + 0.115(Mn) + 3.665(P) - 3.667(S) \quad (1)$$

(Mtr = 0.9741)

$$\epsilon_G(As) = 1.329 - 1.055(C) - 0.198(Si) - 0.170(Mn) + 0.295(P) - 3.772(S) \quad (2)$$

(Mtr = 0.9886)

$$\epsilon_G(QT) = 1.145 - 0.842(C) - 0.470(Si) - 0.059(Mn) - 0.011(P) - 5.775(S) \quad (3)$$

(Mtr = 0.8858)

ε_G: 溝底ひずみ, (N): 焼ならし組織, (As): 徐冷法による球状化組織
(QT): 焼入焼戻し法による球状化組織

(): 各元素の重量%

Mtr: 重相関係数

式(1)(2)(3)より、各々の熱処理組織に対し、 E_{G1} は S に対し大きな負の係数を示した。即ち S 量の増加に対し、加工限界率が減少することを示している。

いっぽう P については、焼ならし組織では大きい正の係数を示したが、徐冷法、焼入れ焼戻し法における球状化組織においても、その係数は、小さいものとなった。当結果は焼ならし組織下で P 含有量の低下は、限界加工率を低下させ、その他の組織ではほとんど影響しないことを示すが、機構上これらの組織間で P の存在形態が変わることが考えにくい。(1)(2)(3)の結果より P は限界加工率に余り影響しないと見るべきであろう。

Fig1は(1)(2)(3)式より、 S の変動に対し限界加工率をプロットしたものである。

S は鋼材中で MnS 介在物として存在し圧延方向に延性な介在物として分布している。 S 含有量の増加により、 MnS 介在物が増加する。著者らは、Table1に示したチマージの圧延前のビレットより、横目、縦目の各々より、 $10mm \times 20mm$ の円柱試験片を採取し、拘束圧縮試験を実施し、側面に出現する割れについて観察し、 MnS 介在物が割れの起点と進行に関与していることを裏付けた。

次に N と加工限界について検討した。供試材として $AIS1524$ 及び $JIS-S40C$ をベース成分として、 N 含有量を $20PPM$ から $120PPM$ にコントロールしたものをを用いた。試験は平滑円柱試験片による拘束圧縮試験により、加工限界を調査した。試験片の前組織は、 $AIS1524$ は圧延のままの組織を、 $S40C$ は球状化組織とした。Fig2にこの結果を示す。当試験結果より、 N 含有量の増加により限界加工率が低下することが解る。尚供試材はいずれも Al 0.022% 以上含有しているが、含有する N が AlN として存在しているものか、フリー N として存在しているものかは、未確認であり、今後更に検討を加える。

異部品の冷間鍛圧造で成形する場合、割れトラブルの原因として、最も頻度の高いものは、 Al_2O_3 等で代表される酸化物系介在物である。 Al_2O_3 は密集性を示し、特に表層領域に存在する時、着じるしく加工限界を低下させる。Fig3は工業的に製造された各種ボルトにおいて割れトラブルが発生した時の、介在物の大きさ、位置、頭部加工率を整理したものである。定性的に、 O 含有量と密集 Al_2O_3 介在物の発生量に相関が認められるため、加工限界は O 含有量に比例すると言える。

尚 Si 脱酸の場合、鋼中に比較的均一に SiO_2 系介在物が存在し、この場合、 SiO_2 系介在物量を示す酸素量と加工限界は、明確に

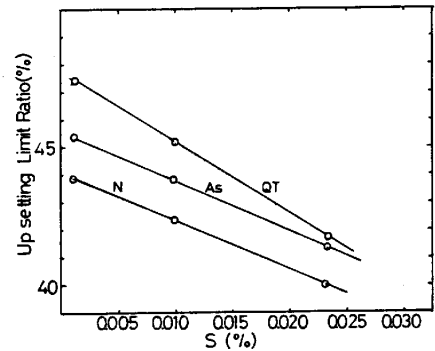


Fig. 1. Relation between up-setting limit ratio and sulfur content.

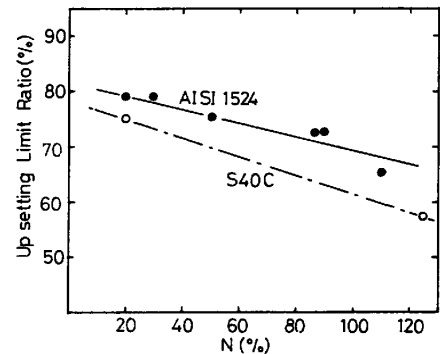


Fig. 2. Relation between up-setting limit ratio and nitrogen content.

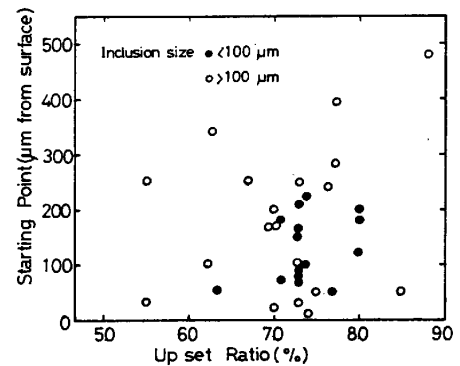


Fig. 3. Results of the analysis on the trouble bolts, produced in C.H. process, caused by the inclusion.

相関づけることができる。

以上述べた様に、不純物元素はPを除いて加工限界に対して、悪影響を及ぼす。尚PはNとともにフェライトを硬化する元素であり、変形抵抗に対して影響を及ぼすため、その低下は無意味ではない。

3. 高炭素鋼の伸線性、鋼線特性と不純物元素の影響について
炭素鋼は、スチールコードやワイヤとして使用されるので Al_2O_3 の介在物の発生を防止する意味で Al を添加しない場合が多い。

従って鋼材に含有するNはほとんどフリー-Nと理解される。着着らは、このNについての影響について調査した。供試材として 0.8% C - 0.2% Si - 0.50% Mn を基本成分とし、Nは 16 PPM、74 PPM、110 PPM の3水準とした。

Fig 4 は鉛パテティング後の機械的性質について、評価したものである。当図よりフリー-N量が高くなるにつれて、パテティング後の絞りが低下することがわかる。

また Fig 5 は、同一材料を伸線速度 1 m/min 及び 20 m/min で伸線し、各減面率でサンプルを採取し、機械的性質を評価したものである。当図よりパテティング時のNによる延性低下は約 60% 減面率まで認められ、それ以上では伸線速度に依存する。

以上のように、Al を添加していない高炭素鋼において、N が高くなると、伸線の初期に横割れ等のトラブルが発生しやうことを示唆している。

伸線性に影響を与える他の不純物元素として S・D が挙げられる。S は Mn S として鋼材に存在し、伸線加工中に崩壊し、ミクロ的クラックを発生させる。D は Al_2O_3 系介在物を意味する場合、介在物が硬質であるため、伸線加工により崩壊、変形はしない。従って極細領域での伸線に対して介在物の両端は空洞となることが予想されカッピー断線を引き起すと考えられる。極細線のカッピー断線部に、しばしば Al_2O_3 系介在物が検出された。

伸線後の鋼線特性に及ぼす P・S の影響について、JIS 82 A を基本成分とし、P 含有量 3 水準 (0.005%, 0.015%, 0.025%) S 含有量 3 水準 (0.007%, 0.015%, 0.028%) を組合わせた 9 水準の供試材により鋼線の特性を調査した。鋼線は、75 mm ϕ 圧延線材を鉛パテティング後、4.5 mm ϕ 及び 3.05 mm ϕ に伸線し、調査した。鋼線の一般的な機械的性質や捻回値について、9 水準の供試材はほぼ同等の値となり、その差は認められなかった。しかし、Vブロックを使用した曲げテストにおいて、P と S に大きな相関が認められた。その結果を Fig 6 に示す。Fig 6 は、P・S のいずれかが低くなると曲げ折損が低下することを示している。また、

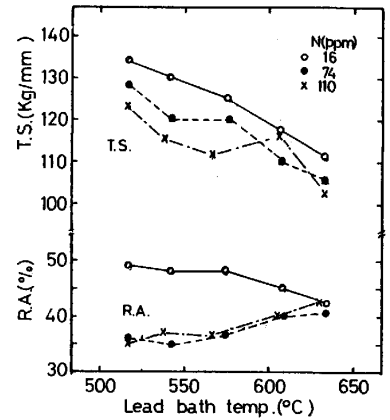


Fig. 4. Influence of nitrogen content on the mechanical properties at lead patenting.

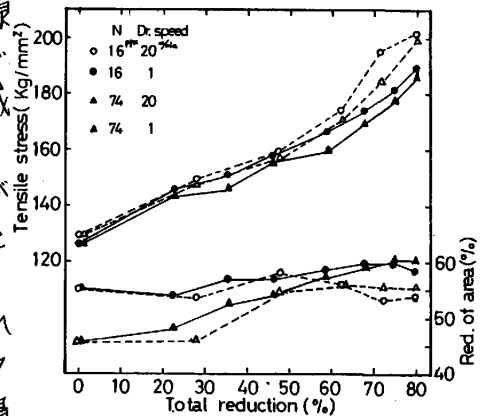


Fig. 5. Influence of nitrogen content and drawing speed on the mechanical properties of wire.

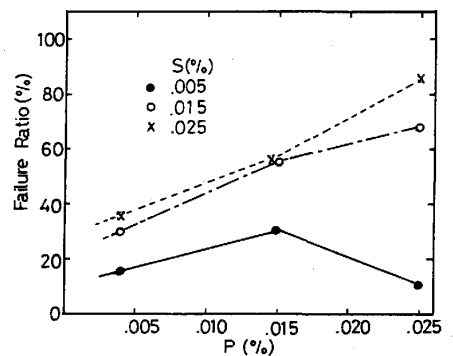


Fig. 6. Results of the V-block bending test.

3. 0.5mm^φ 鋼線を冷間平圧延を實施し、コバ部を削りを評価した実験では、S含有量が低くなると加工限界が高くなる結果を得た。

以上のように鋼線の特性に対して、特に靱性面において、P、Sの何れかの元素も影響があることが明確となった。

4. 焼入・焼戻し特性に及ぼす不純物元素の影響

一般的にNは AlNとして鋼材中に析出している場合、再加熱時のオーステナイト結晶粒を決定し、焼入れ性に影響を与える。最近、省資源・コストダウン鋼として使用が拡大しているB鋼においては、BとNの結合力が強いので、Bの焼入れ性を安定にさせるには、Nをコントロールすることが必要である事も既に報告されている。Fig7は製鉄ラインにおける中炭素B鋼のインフレクションポイントでのジョミニ硬度とNの関係を整理したものである。尚縦軸は、N以外の成分を補正する意味で、著者等独自の予測式で求めた硬度と実測値の差を示した。

次に焼入れ性や焼戻し後の靱性に影響する因子として、オーステナイト結晶粒がある。最近肌焼鋼の浸炭温度が高温化されており、従来のAlNによる結晶粒コントロール法では、950°Cの温度が限界である。より高温浸炭を指向する場合、Nb・Ti等の炭化物形成元素によるピンニング効果を利用する必要がある。Tiを利用した著者らの研究では、Nを低く抑えることにより、最少限のTi添加量で結晶粒粗大化温度を高めることができる。当結果をFig8に示す。

低温焼戻し靱性に影響する元素としてPがあることは、よく知られている。著者らの研究ではBを添加することより、Pの影響を減じることができることは既に報告した。しかしB鋼においても低P化により、低温焼戻しによる靱性を改善する。

著者らは、0.35C-0.90Mn-0.0015B鋼をベース鋼としてP0.005%及び0.021%の2水準の供試材を用いて、低温焼戻し領域を調査した。試作したM20ボルトの調査において、各焼戻し温度に対してくさび引張り試験を實施した結果、低P鋼化により、首下破断率の減少が認められた。当結果をTable2に示す。

また、130kgf/mm² 抗張力ボルトによる遅延破壊試験では、低P鋼よりその特性の改善が確認できた。

5. 結言

当報告において、主に不純物元素の低減による特性の改善を中心に述べた。しかし不純物元素の存在により、特性の向上・安定化がはかられることも多く、これらを総合して、不純物元素を位置付けることが必要である。

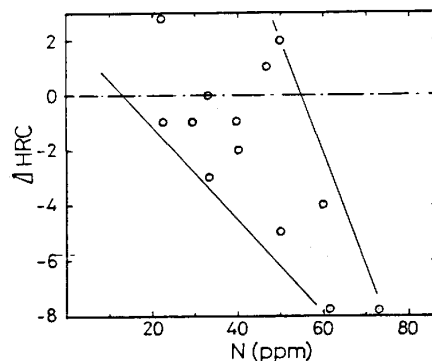


Fig. 7. Influence of nitrogen content on Jominy-hardness in B-steel.

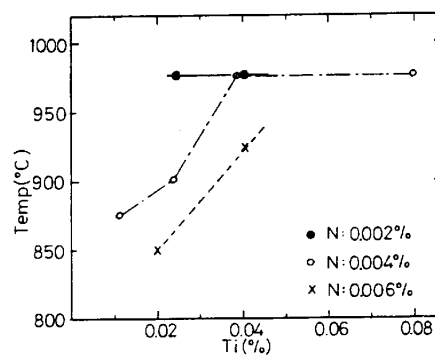


Fig. 8. Influence of nitrogen content on the grain coarsening temperature in the Ti added steel.

Table 2. Results of the wedge test in the M20 bolt of B-steel.

焼戻し温度 (°C)	首下破断率 (%)	
	低P材	比較材
200	100	100
250	100	100
300	20	100
350	0	100
400	0	0